

李启成,何书耕.用振幅变化长短时均值比实现地震预警中 P 波自动拾取[J].地震工程学报,2019,41(1):138-146.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.138

LI Qicheng, HE Shugeng. Automatic Picking up of P-wave First Arrival in Earthquake Early Warning Using STA/LTA Method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(1): 138-146. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.138

用振幅变化长短时均值比实现 地震预警中 P 波自动拾取

李启成, 何书耕

(辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 地震 P 波到时快速、精确的自动拾取是实现地震预警的第一步。目前所有 P 波到时自动拾取方法都需要进一步考虑准确度问题, 据此提出用“振幅变化”长短时均值比方法拾取 P 波到时。研究表明引进“振幅变化”作为特征函数比 Allen 的“振幅变化平方”更能突显地震波初至时刻的“突变”特征。对“振幅变化长短时均值比方法”和 Allen 的“振幅变化平方长短时均值比方法”进行抗噪音分析表明, 在较低信噪比条件下, Allen 方法不能准确地拾取 P 波到时, 而新方法依然能较准确地拾取 P 波到时。在较高信噪比条件下, 用两种方法拾取的 160 个 $M_s > 4.0$ 地震 P 波到时, 其误差大都在允许范围内, 但新方法拾取的准确度略高。新方法可以看做是对长短时均值比方法的拓展。

关键词: 地震预警; P 波初至; 振幅变化; STA/LTA 变换

中图分类号: P315.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)01-0138-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.01.138

Automatic Picking up of P-wave First Arrival in Earthquake Early Warning Using STA/LTA Method

LI Qicheng, HE Shugeng

(Department of Geology, Liaoning Technical University, Fuxin, 123000 Liaoning, China)

Abstract: The first step to realize earthquake early warning is to pick P-wave arrival time quickly, accurately, and automatically. In the current automatic methods of picking up P-wave arrival time, the anti-interference ability needs to be encountered; thus, in this study, the short-term average/long-term average (STA/LTA) method for detecting amplitude changes is proposed for picking up P-wave arrival times. The study shows that compared with the Allen algorithm, the amplitude change can be used as the characteristic function to highlight the mutation feature of seismic wave arrival time. Moreover, using the STA/LTA method, the pick-up deviation of seismic wave arrival times caused by the interference can be reduced. Analyses of anti-interference in the STA/LTA method and Allen algorithm show that in the presence of a large amplitude inter-

收稿日期: 2017-11-09

基金项目: 辽宁省教育厅项目(LJYL040); 断层滑动速度研究(551610001219)

第一作者简介: 李启成(1963-), 男, 辽宁人, 副教授, 主要从事地球物理学研究。E-mail: 731732866@QQ.com。

ference, the Allen algorithm cannot pick up P-wave arrival times because the peak value does not appear in the P-wave first arrival position; however, the anomaly in the P-wave arrival time position is still obvious when using the proposed method. Under less amplitude disturbance, the two methods are used to pick up the P-wave arrival time of 160 $M_s \geq 4.0$ earthquakes, and the accuracy of the new method is slightly higher. The new method can be seen as an extension of the STA/LTA transform method.

Keywords: earthquake early warning; first arrival of P-wave; amplitude change; STA/LTA transform

0 引言

地震预警是针对地震预报能力不足提出的震时预警方法。其一般原理是,把地震探测器安置在活断层附近,当地震发生时,由于 P 波传播速度比 S 波快,地震探测器首先接收到 P 波,在破坏力很强的 S 波到达前用电磁波把地震消息传达到城市,通知人们在地震 S 波到达前做好应急准备。最近几年发展迅速的地震预警技术需要自动、快速、准确确定 P 波到时。

地震 P 波自动拾取方法一直在改进,到目前为止常用方法主要有长短时均值比方法,即 STA/LTA 方法^[1-5];AIC 准则^[6-8];高阶统计计量方法,即 PAI-S/K 方法^[9-10];自回归方法定义进行地震震相判别的方法^[11];除此之外还有分形维法和神经网络法等^[5]。

长短时均值比方法是目前广泛使用的一种地震波初至拾取方法,其原理是取地震波特征函数在短时间内平均值与长时间内平均值之比确定地震波初至,即长短时平均值法。地震波初至时刻就是用长短时平均值法计算得到超过阈值的时刻。长短时均值比方法具有算法简单、计算速度快和特征函数多样等优点,非常符合地震预警的要求。其不足是特征函数的不同选择使得到时的拾取产生差异,短时间和长时间取得过短、过长都会造成地震触发错误。AIC 准则认为地震发生前后对应着两个不同的稳态过程,AIC 函数的极小值对应 P 波初至时刻。AIC 函数峰值点尖锐,从这种意义上说该方法拾取到时的准确度高,但在不同时窗下拾取到时位置不同,所以该方法仅仅适合地震波初至位置大致已知情况,并且需与其他方法联合使用才适用地震预警的速度要求。PAI-S/K 方法定义了地震波形峰度和偏斜度函数,判断上述二函数曲线的极值点,以极值点前曲线斜率最大位置作为地震波到时。该算法计算简单、速度快,但抗噪音能力不强。自回归方法将地震信号分为两个局部统计时段,取自相关最小值

作为 P 波到时。该方法拾取到时精度高,但计算速度慢,不适用于地震预警。分形维数方法认为地震信号与噪音叠加时分形维数发生变化,并据此拾取 P 波。该方法应用于地震预警的最大障碍是计算速度慢。神经网络法采用峰值振幅、时窗内均方根振幅比、峰值与其前后峰值包络斜率及噪声与信号比值等作为神经网络输入因素,是一种综合的 P 波到时拾取方法。其最大优点是适用性强,缺点是计算复杂、用时长。

上述方法都是自动拾取 P 波到时的常用方法,都有一定的适用条件。地震预警要求 P 波拾取速度快,长短时均值比方法可以满足这一要求,通过选择适当的特征函数,可以提高其拾取精度。

1 用振幅变化拾取 P 波到时

地震记录有位移、速度和加速度三种,其中加速度的变化迅速,故本文在加速度记录中拾取 P 波到时。

Allen^[1]定义的拾取 P 波的特征函数为:

$$CF_P = x_{ud}(t)^2 + [x_{ud}(t) - x_{ud}(t-1)]^2 \quad (1)$$

式中: $x_{ud}(t)$ 是 t 时刻的地震记录。

Allen 的研究用“振幅变化平方”作为特征函数拾取 P 波,由于 P 波初至时振幅都比较低,以 $\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 为单位小于 1,甚至远远小于 1,平方后数值变小,从而使异常降低。

地震预警只针对破坏性地震进行。Kanamori^[12]利用地震波到达后 3 s 内 P 波的初始周期判定是否可能发生破坏性地震。研究表明 P 波初始周期大于 1 s 时发生破坏性地震的可能性极高;而当 P 波初始周期大于 2 s 时肯定发生破坏地震。这说明破坏地震发生时,由于地震震源体很大,其初始振动频率低,远远小于地震记录频率,所以相邻地震记录点之间的变化小,一般远远小于 1,这么小的数值平方后变得更小,所以振幅变化平方后降低了表现异常的能力。

长短时均值比方法所用特征函数不同会导致自动拾取 P 波到时产生差异。为提高 P 波拾取准确度,提出用地震波“振幅变化”,而不是“振幅变化平方”作为特征函数。

假定地震记录的离散序列为 $\{x_i\}$, 序列长度为 N , 定义“振幅变化”函数为

$$P_i = |x_i| + |x_{i+1} - x_i|, \quad 0 \leq i \leq N - 2 \quad (2)$$

式(1)在地震波初至振幅变化小于 1 的情况下会降低异常,而式(2)不会。

地震前后,各种随机噪音是不可避免的。噪音有时也会出现较大的“振幅变化”,所以仅仅用“振幅变化”确定地震波初至会有较多错误机会。如果进一步用“振幅变化”作为特征函数进行长短时均值比计算,可以“过滤”随机噪音,提高拾取地震波到时准确性。

以“振幅变化”为特征函数的长短时均值比方法的具体实施办法如下。

对地震记录用式(2)计算实时得到 P_i 序列,地震记录可以是加速度、速度或位移,本文采用加速度。对上述序列进行长短时均值比计算得到序列 $\{P_i\}$ 。

$$\{P_i\} = \frac{\sum_{j=N_3-N_4+i}^{i+N_3} P_j}{N_4} \cdot \frac{\sum_{j=i}^{i+N_3} P_j}{N_3},$$

$$0 \leq i \leq N - 2 - N_3, \quad N_4 \ll N_3 \ll N \quad (3)$$

式中: N_4 为长短时均值比方法的短尺度, N_3 为

长尺度。

设 P_c 为发生破坏性地震的“振幅变化长短时均值比”阈值,阈值的设定可以排除噪音。令 $P_n = \max\{P_i\}$, 可用式(4) 作为是否触发地震预警的标准。

$$P_n \geq P_c \quad (4)$$

阈值 P_c 的确定应考虑环境噪音、仪器噪音和地方震特点。本文对汶川 160 个 $M_S > 4.0$ 地震在 S 波到达前进行长短时均值比计算,得到 P 波到时的 P_n 平均值为 8.79,而非 P 波到时的 P_n 平均值 3.48。据此,汶川地区的地震预警阈值 P_c 初步取 5.6,该值与长短时选择有关。

通过大量的模拟计算表明,短时间取得相对短一些,长时间取相对长一些,P 波到时的拾取精度比较高。我们短时间取 0.1 s,长时间取 1.2 s。

如图 1 所示,分别用“振幅变化平方”和“振幅变化绝对值”为特征函数拾取 P 波。用振幅变化平方拾取的 P 波峰值平缓,使得拾取的 P 波到时准确度不高;而用振幅变化绝对值拾取的 P 波峰值尖锐,拾取准确度高。

2 新方法的实施步骤

用“振幅变化的长短时均值比方法”确定图 2 中地震记录的 P 波到时,并在此基础上总结出用该方法实现地震预警的一般步骤。

图 2(a)是在地震波到达前 2 s 施加的噪音信号,噪音信号幅值小于地震波初至垂直方向振幅一个数量级。图 2(b)是采样周期为 0.005 s 的地震垂直方向加速度记录,P 波初至时刻为 2 s。

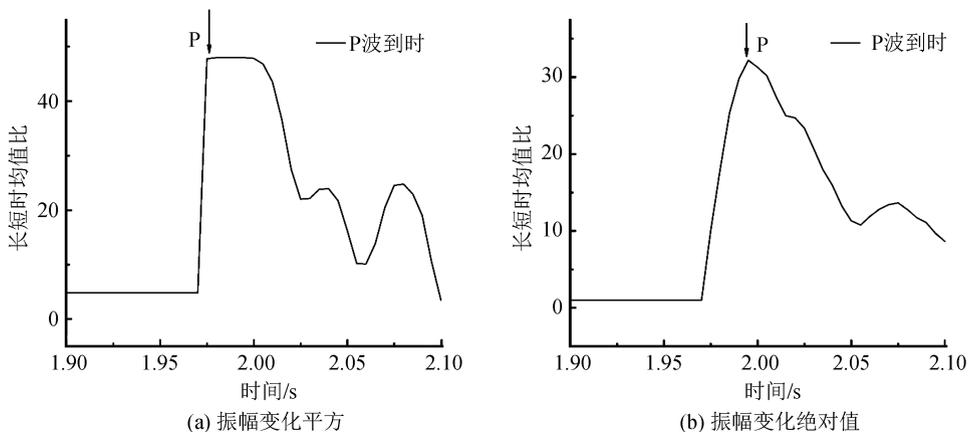


图 1 用振幅变化平方和用振幅变化绝对值拾取 P 波到时

Fig.1 The P-wave first arrival time picked up by “square of amplitude change” and “absolute value of amplitude change”

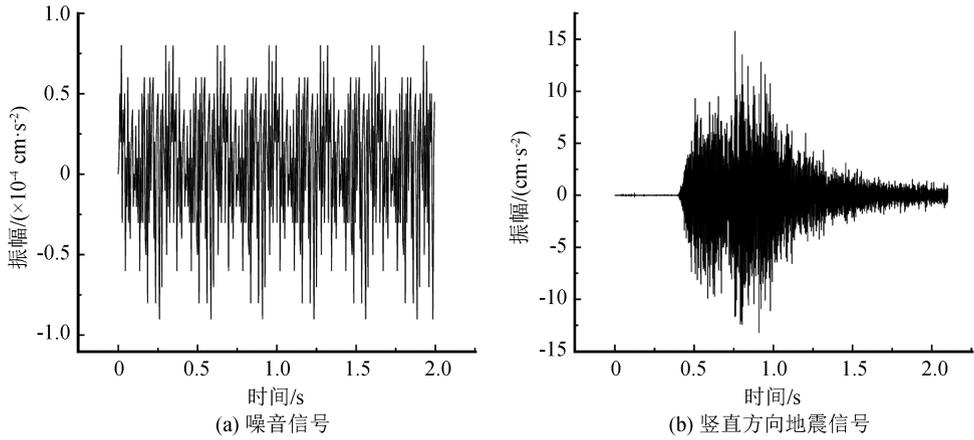


图 2 地震信号

Fig.2 Seismic signal

图 3 是对图 2 中地震数据进行了“振幅变化长短时均值比”计算。其中图 3(a)中的曲线反映了 P

波到时的“突变”;在计算“振幅变化”基础上进行长短时均值比计算,突出了 P 波到时[图 3(b)]。

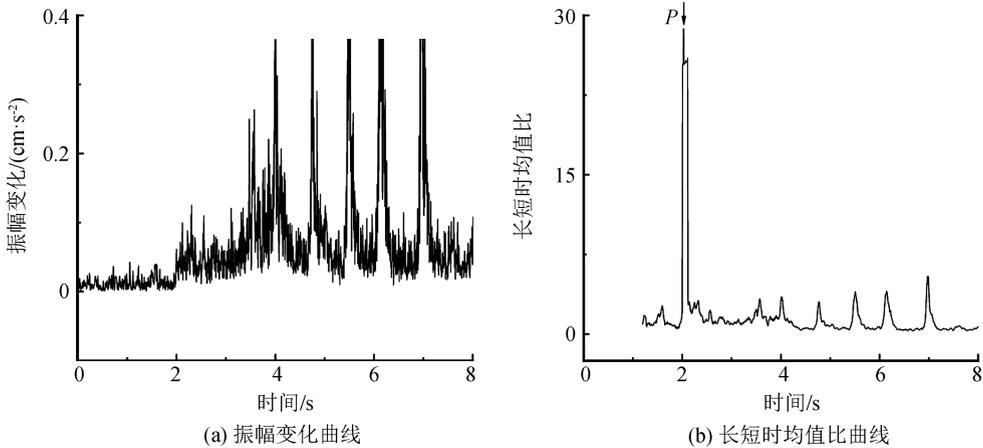


图 3 对图 2 地震动计算得到的振幅变化和长短时均值比曲线

Fig.3 Curves of amplitude change and STA/LTA transform calculated from Fig.2

根据介绍的“振幅变化长短时均值比方法”的理论和具体实践,把上述方法应用于地震预警工作中,可以按以下步骤实现:

- (1) 实时输入垂直分量地震记录流;
- (2) 用式(2)计算地震数据的特征函数;
- (3) 确定长、短窗长度后,按确定的步长同步移动长、短窗,同时实时用式(3)对特征函数计算 STA/LTA 数值;
- (4) 用式(4)判断 STA/LTA 是否超过阈值 P_c ,若是则取其对应的采样时间为地震波到时,同时触发地震预警装置;否则返回到步骤(1)。

图 4 是把以“振幅变化”为特征函数的长短时均值比方法应用于地震预警的流程图。

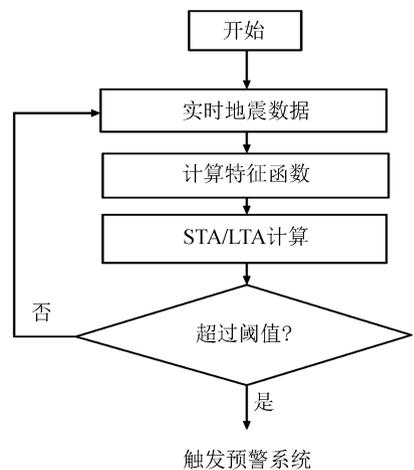


图 4 地震预警流程图

Fig.4 Flow chart of earthquake early warning

3 新方法的抗噪音分析

地震预警的关键技术之一是P波到时自动拾取的抗噪音问题。对图5中汶川一地震记录在P波到达前2s施加不同振幅的噪音,其中图5(a)是在地震波到达前2s前施加的噪音信号,其振幅可

以从 $10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 增加到 $10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$;图5(b)是采样周期为0.005s的汶川地震垂直分量加速度记录,P波初至振幅为 $10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 数量级。分别用“振幅变化平方长短时均值比”方法(Allen法)和“振幅变化长短时均值比方法”(新方法)拾取P波到时。

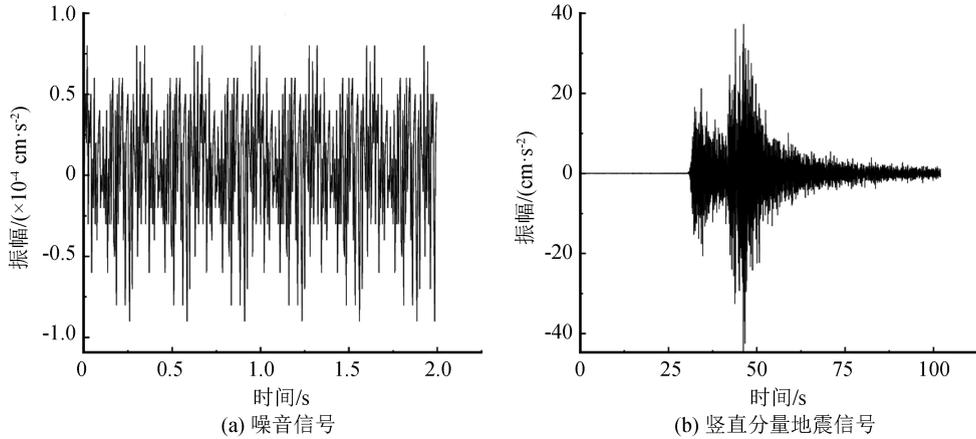


图5 汶川地震信号

Fig.5 Seismic signals of wenchuan earthquake

图6是分别用Allen法和新方法对图5中的地震P波到达前2s施加 $10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 噪音振幅(小

于P波初至振幅二个数量级)得到的相关曲线。其中图6(a)、(b)分别是用Allen方法得到的“振幅变

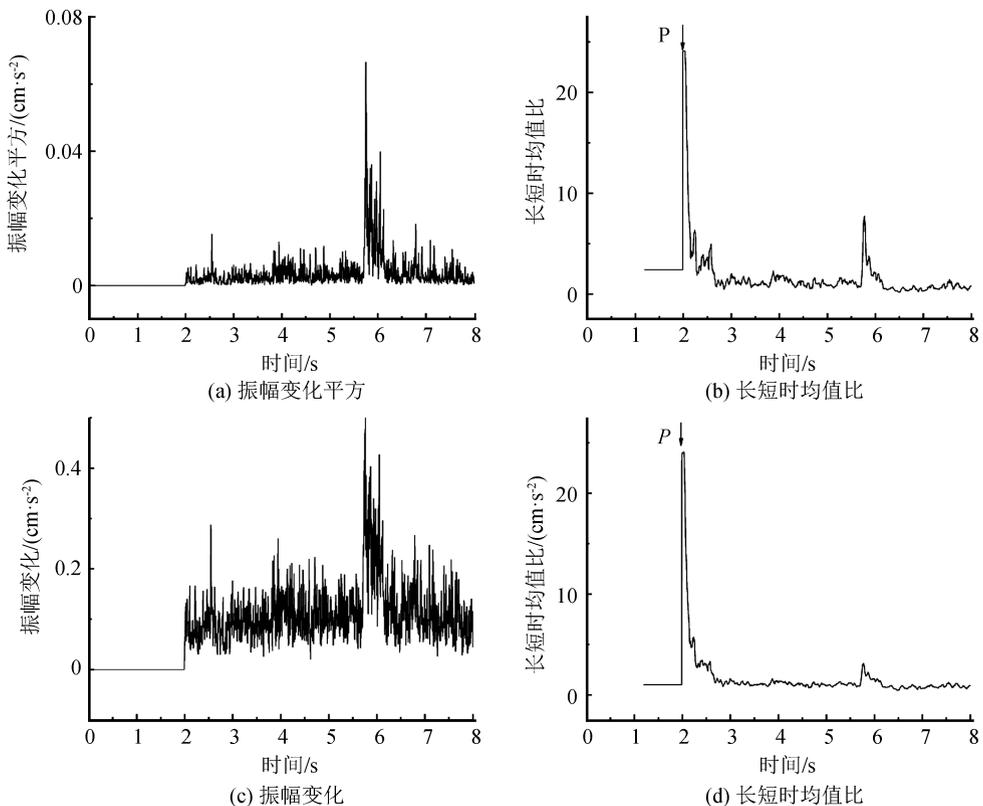


图6 噪音振幅为 $10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时用Allen方法和新方法拾取的P波到时

Fig.6 P-wave arrival times picked up by Allen method and new method when the noise amplitude is $10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$

化平方”曲线和对应的长短时均值比曲线;图 6(c)、(d)分别是用新方法得到的“振幅变化”曲线和对应的长短时均值比曲线。可以看出在噪音振幅小的条件下,两种方法都准确地拾取了 P 波到时。

图 7 是分别用 Allen 法和新方法对图 5 中的地震施加 $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 噪音振幅(小于 P 波初至振幅一个数量级)时得到的相关曲线。其中图 7(a)、(b)

分别是用 Allen 方法得到的“振幅变化平方”曲线和对应的长短时均值比曲线;图 7(c)、(d)分别是用新方法得到的“振幅变化”曲线和对应的长短时均值比曲线。可以看出在噪音振幅增大的条件下,虽然两种方法都准确地拾取了 P 波到时,但新方法在 P 波到时的异常明显,在规定阈值的条件下更容易准确地拾取 P 波。

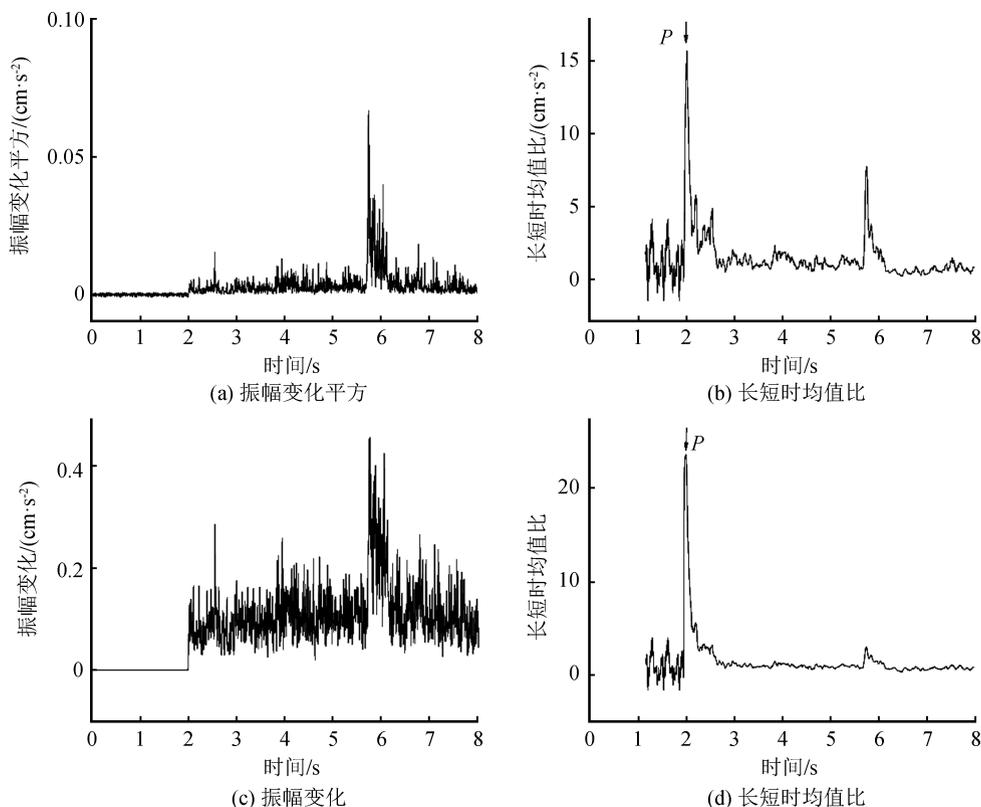


图 7 噪音振幅为 $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时用 Allen 方法和新方法拾取的 P 波到时

Fig.7 P-wave arrival times picked up by Allen method and new method when the noise amplitude is $10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$

图 8 是用 Allen 和新方法分别对图 5 中的地震施加振幅为 $10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 噪音振幅时拾取的 P 波到时。此时的噪音振幅与地震 P 波振幅同数量级,但小于 P 波初至振幅。其中图 8(a)、(b)分别是用 Allen 方法得到的“振幅变化平方”曲线和对应的长短时均值比曲线;图 8(c)、(d)分别是用新方法得到的“振幅变化”曲线和对应的长短时均值比曲线。可以看出在噪音振幅继续增大的条件下,Allen 方法由于峰值未出现在 P 波初至位置,已经不能拾取 P 波到时,但新方法在 P 波到时处的异常明显。

为进一步验证用“振幅变化长短时均值比方法”拾取 P 波到时的抗噪音能力,选择震级大于 $M_s 4.0$ 的汶川大地震和余震共 160 条记录(采样周期为 0.005 s),首先用手工拾取 P 波到时,以此为基准,

对用 Allen 方法和新方法拾取到的 P 波到时进行比较,偏差 $\leq 0.1 \text{ s}$ 认为拾取成功。拾取分二种情况进行,地震到达前噪音振幅分别为 10^{-5} cm/s^2 和 10^{-4} cm/s^2 。

图 9(a)是噪音振幅 10^{-5} cm/s^2 时,用 Allen 方法得到的 P 波自动拾取统计偏差点状图及统计直方图;图 9(b)是噪音波振幅为 10^{-5} cm/s^2 时,用新方法得到的 P 波自动拾取统计偏差点状图及统计直方图。可以看出两种方法拾取 P 波到时的偏差都 $\leq 0.1 \text{ s}$,也就是都正确触发了地震预警,但用新方法拾取的偏差更小些。

图 10(a)是噪音振幅 10^{-4} cm/s^2 时,用 Allen 方法得到的 P 波自动拾取统计偏差点状图及统计直方图;图 10(b)是噪音波振幅为 10^{-4} cm/s^2 时,用新

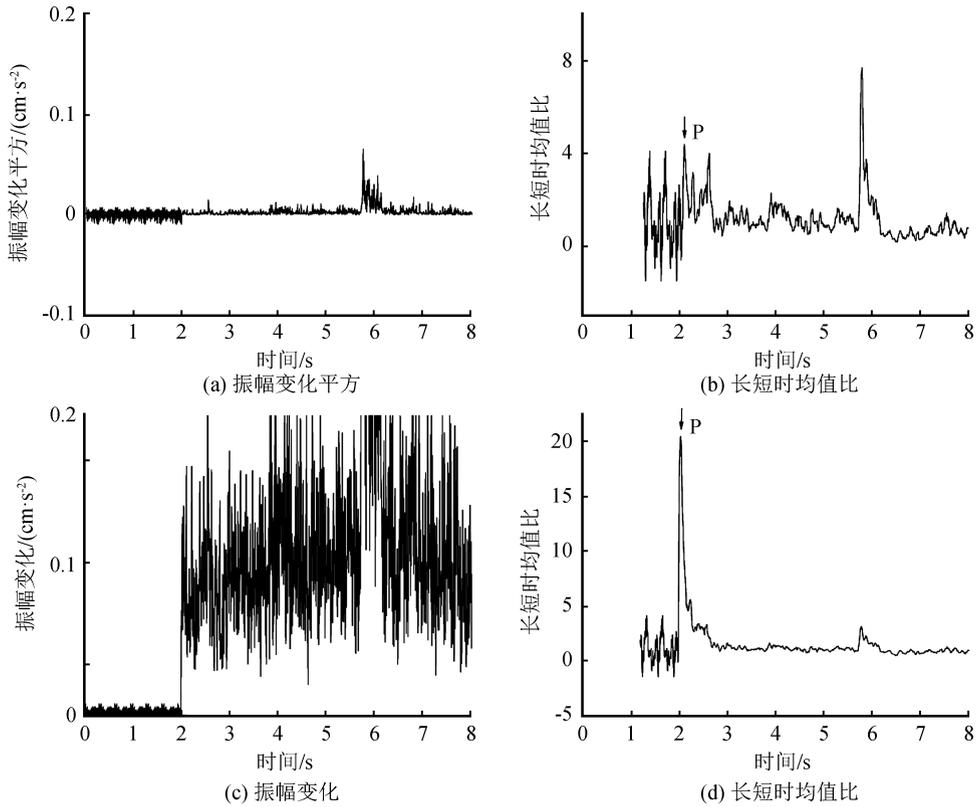


图8 噪音振幅为 $10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$ 时用 Allen 方法和新方法拾取的 P 波到时

Fig.8 P-wave arrival times picked up by Allen method and new method when the noise amplitude is $10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$

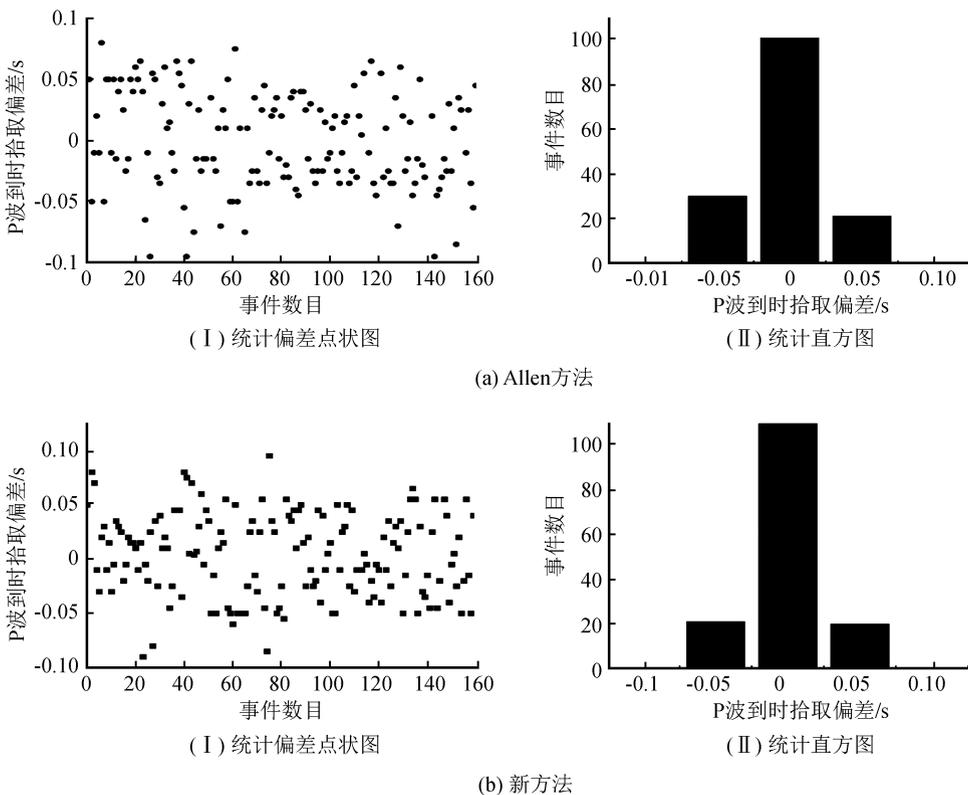


图9 噪音振幅为 10^{-5} cm/s^2 时用 Allen 方法和新方法拾取的 P 波到时偏差

Fig.9 Deviation of P-wave arrival times picked up by Allen method and new method when the noise amplitudes is 10^{-5} cm/s^2

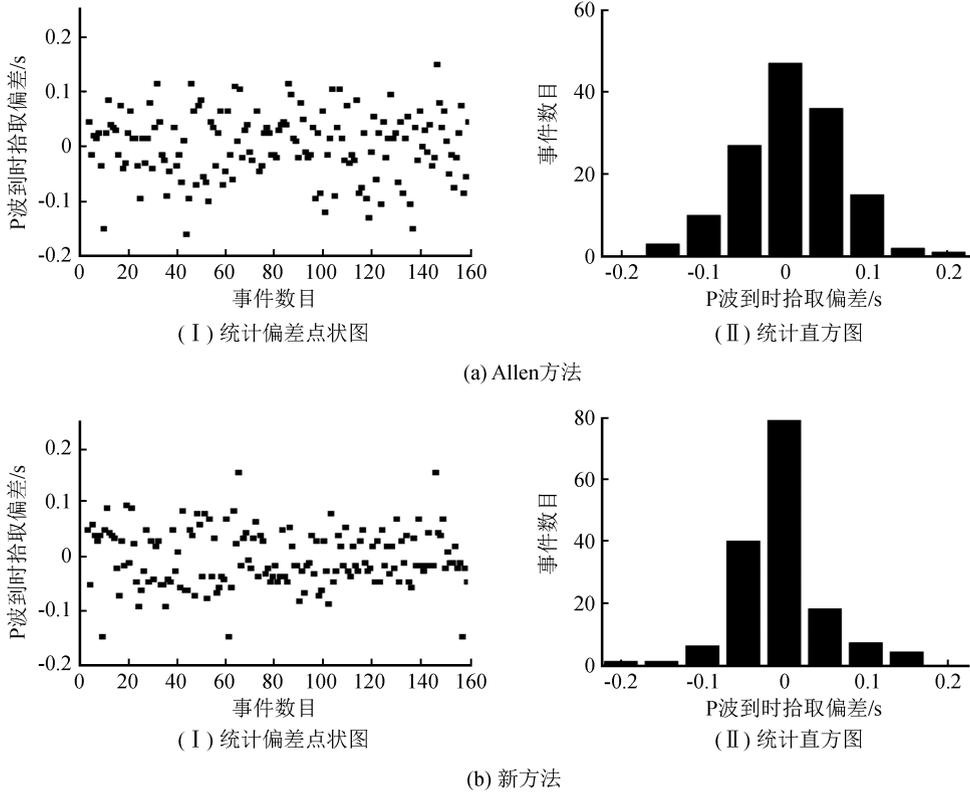


图 10 噪音振幅为 10^{-4} cm/s^2 时用 Allen 方法和新方法拾取的 P 波到时偏差

Fig.10 Deviation of P-wave arrival times picked up by Allen method and new method when the noise amplitudes is 10^{-4} cm/s^2

方法得到的 P 波自动拾取统计偏差点状图及统计直方图。可以看出两种方法拾取 P 波到时偏差大多数都小于 0.1 s,但用 Allen 方法拾取的 P 波到时偏差大于新方法的偏差。

4 讨论与结论

提出抗噪音能力相对较强的“振幅变化长短时均值比方法”这一拾取 P 波到时的新方法,并尝试将其应用于地震预警实际工作中。

(1) “振幅变化长短时均值比”方法引进“振幅变化”绝对值作为特征函数比“振幅变化平方”具有更强的捕捉地震波到时能力。在此基础上,对“振幅变化”绝对值做长短时均值比计算相当于把短时间内的“振幅变化”平均值与相邻长时间内的“振幅变化”平均值进行比较,得到短时间内的“振幅变化”相对于长时间内“振幅变化”占的百分比,“过滤”掉了短时间内相对较大的振幅变化。其中百分比超过阈值者就是地震波从无到有的时刻,即 P 波到达时刻。

(2) 新方法应用于地震预警的主要步骤是:实时输入地震数据记录、特征函数计算、长短时均值比计算、用阈值判断是否触发地震预警。新方法计算

时调用函数少,计算速度快,P 波到时计算几乎不占用机时,提高了地震预警的效率。

(3) 抗噪音实例分析表明,在较大振幅噪音条件下,Allen 方法已经不能拾取 P 波到时,而新方法在 P 波到时处的异常依然明显,说明新方法的抗噪音能力强。在较小振幅噪音条件下,用两种方法拾取了 160 个 $M_s > 4.0$ 地震 P 波到时,两种方法大都在允许的误差范围内拾取了 P 波到时,但新方法拾取的准确度略高。新方法可以看做是对长短时均值比方法的拓展。

(4) 地震预警工作中,确定一个触发阈值可以排除噪音影响,阈值的确定应考虑仪器和环境因素,还要考虑地方震的特点。根据对汶川 160 个地震初步研究结果,该地区地震预警触发阈值 P_c 为 5.6,该阈值与长短时选择有关。

致谢:感谢中国地震局工程力学研究所提供的数据支持。

参考文献(References)

[1] ALLEN R V. Automatic Earthquake Recognition and Timing from Single Traces[J]. BSSA, 1978, 68(5): 1521-1532.

- [2] ALLEN R V. Automatic Phasepickers; Their Present Use and Future Prospects[J]. BSSA, 1982, 72(6B): 225-242.
- [3] JONES J P, VAN der Baan M. Adaptive STA-LTA with Outlier Statistics[J]. BSSA, 2015, 105(3): 1606-1618.
- [4] 田优平, 赵爱华. 基于小波包和峰度赤池信息量准则的 P 波震相自动识别方法[J]. 地震学报, 2016, 38(1): 71-85.
TIAN Youping, ZHAO Aihua. Automatic Identification of P-phase Based on Wavelet Packet and Kurtosis-AIC Method[J]. Acta Seismologica sinica, 2016, 38(1): 71-85.
- [5] 何先龙, 余天莉, 高峰. 一种地震 P 波和 S 波初至时间自动拾取的新方法[J]. 地球物理学报, 2016, 59(7): 2519-2527.
HE Xianlong, SHE Tianli, GAO Feng. A New Method for Picking up Arrival Times of Seismic P and S Waves Automatically[J]. Chinese Journal of Geophys, 2016, 59(7): 2519-2527.
- [6] Akaike. Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle[C]//2nd International Symposium on Information Theory. Budapest: Akademiai Kiado, 1973: 267-281.
- [7] MAEDA N. A Method for Reading and Checking Phase Time in Auto-processing System of Seismic Wavedata [J]. Zisin, 1985, 38(3): 365-379.
- [8] 王继, 陈九辉, 刘启元, 等. 流动地震台阵观测初至震相的自动检测[J]. 地震学报, 2006, 28(1): 42-51.
WANG Ji, CHEN Jiuhui, LIU Qiyuan, et al. Automatic Onset Phase Picking for Portable Seismic Array Observation[J]. Acta Seismologica Sinica, 2006, 28(1): 42-51.
- [9] SARAGIOTIS C D, PAI-S/K. A Robust Automatic Seismic P Phase Arrival Identification Scheme[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(60): 1395-1404.
- [10] 刘劲松, 王赞, 姚振兴, 等. 微地震信号到时自动拾取方法[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1660-1666.
LIU Jinsong, WANG Yun, YAO Zhenxing, et al. On Microseismic First Arrival Identification: A Case Study[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1660-1666.
- [11] REINOUD Sleeman, TORILD Van Eck. Robust Automatic P-phase Picking: An On-line Implementation in the Analysis of Broad-band Seismogram Recording[J]. Phys Earth Planet Inter, 1999, 113(1-4): 265-275.
- [12] KANAMORI H. Real-time Seismology and Earthquake Damage Mitigation[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2005, 33: 195-214.